



Etude de l'activité cérébrale motrice lors de mouvements isolés successifs de l'index

Rahaf Al-Chwa

► To cite this version:

Rahaf Al-Chwa. Etude de l'activité cérébrale motrice lors de mouvements isolés successifs de l'index . Informatique. 2017. hal-01514998

HAL Id: hal-01514998

<https://inria.hal.science/hal-01514998>

Submitted on 26 Apr 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Étude de l'activité cérébrale motrice lors de mouvements isolés ou successifs de l'index

Rapport de Stage

présenté et soutenu publiquement le 5 avril 2017

pour l'obtention du

Master 1 de l'Université de Lorraine

(Mention BioSciences et Ingénierie de la Santé option Biologie Cellulaire et
Physiologie)

par

Rahaf Al-chwa

Composition du jury

Examineur : Claudepierre Thomas, Schohn Hervé, Thornton Simon, Vuissoz Isabelle

Encadrants : Laurent Bougrain, Maître de conférences à l'Université de Lorraine
Sébastien Rimbert, Doctorant à l'Université de Lorraine

Remerciements

Tout d'abord j'aimerais remercier Sébastien Rimbert, mon maître de stage, pour son implication dans mon encadrement, pour sa patience au dessus de la norme et sa capacité surnaturelle à résoudre tous les problèmes que j'ai pu rencontrer ou induire. Je le remercie aussi d'avoir supporté mon ignorance face à certains domaines informatiques et de m'avoir aidé à m'y familiariser.

Je remercie Laurent Bougrain pour m'avoir permis de réaliser ce stage et pour sa sympathie hors norme. Je le remercie aussi d'avoir partagé avec moi ses connaissances informatiques et pour son affection pour le chocolat ce qui a créé un point commun entre nous. Je le remercie aussi d'avoir eu confiance en moi et de m'avoir confié le matériel EEG qui est très coûteux.

Je remercie Francesco Giovannini pour avoir partagé avec moi sa vision très juste du monde. Je remercie également Tamara Tosic pour ses supers conseils afin d'avoir un lieu de travail moins pollué et plus sain. Et je les remercie tous les deux pour les supers séances de sport très instructives.

J'aimerais remercier tous les membres de l'équipe Neurosys pour leur accueil chaleureux et pour les discussions très sympathiques qu'on a eues, en différentes langues, ce qui m'a permis de renforcer certaines des langues que je parle et a rendu mon séjour très agréable.

Je remercie tout particulièrement mes voisins de bureau de l'équipe Kiwi, Julie Bu Daher et Pierre-Edouard Osche pour leur amabilité et leur soutien.

Je tiens à remercier les étudiants et les stagiaires ukrainiens pour leur aide précieuse dans le cadre de mon travail, de m'avoir appris quelques mots en ukrainien et pour les parties de cartes après le travail.

Je remercie surtout tous les sujets qui ont participé à l'expérience pour leur grande patience envers moi car l'expérience était plutôt longue et pouvait devenir désagréable vers la fin.

Sommaire

Présentation du lieu de stage	1
-------------------------------	---

Chapitre 1

Introduction et problématique

1.1	Conceptualisation du mouvement à l'échelle cérébrale	3
1.1.1	Complexité du mouvement à travers un exemple	4
1.1.2	Communication neuronale et transmission synaptique	4
1.1.3	Les deux types de mouvements	4
1.1.4	Place du cerveau dans le mouvement volontaire	5
1.1.5	Le cortex moteur	6
1.2	L'électroencéphalographie	6
1.2.1	Les neurones pyramidaux	7
1.2.2	Les différents rythmes EEG	7
1.2.3	Variation de l'activité cérébrale durant un mouvement volontaire	8
1.3	Problématique du stage	9

Chapitre 2

Matériel et méthodes

2.1	Mouvement étudié	11
2.2	Sujets	11
2.3	Expériences	11
2.3.1	Expérience 1	12
2.3.2	Expérience 2	13
2.4	Procédure	14
2.4.1	Mise en place de l'expérience	14
2.4.2	Vérification du signal EEG	14
2.4.3	L'électromyogramme	14
2.4.4	Conditions expérimentales	15
2.4.5	Apprentissage de la tâche expérimentale	15
2.5	Analyse des données	15

Chapitre 3

Résultats

3.1	Comparaison des réponses canoniques	17
3.1.1	Réponse canonique yeux fermés dans l'alpha et le bêta	17

3.1.2	Réponse canonique yeux ouverts dans l'alpha et le bêta pour l'expérience 1	18
3.1.3	Comparaison des réponses canoniques yeux ouverts et yeux fermés	18
3.2	Comparaison des réponses cérébrales lors de mouvements successifs séparés d'intervalles longs	18
3.3	Comparaison des réponses cérébrales lors de mouvements successifs séparés d'intervalles courts	19

Chapitre 4

Discussions et perspectives

4.1	Absence de l'ERD	27
4.2	Modulations de l'ERS	28
4.3	Modulations induites par la réduction des intervalles de temps entre deux mouvements successifs	29
4.4	Perspectives	30

Chapitre 5

Bilan personnel

Chapitre 6

Résumé

Bibliographie

37

Présentation du lieu de stage

Mon stage s'est déroulé au Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications (LORIA) situé à Vandoeuvre-les-Nancy dans l'équipe Neurosys. Cet établissement est une unité mixte de recherche commune au CNRS, à l'université de Lorraine et à l'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (Inria). Il est composé d'une trentaine d'équipes qui travaillent sur des projets assez variés en informatique.

Les membres de l'équipe Neurosys travaillent sur plusieurs thématiques liées aux Neurosciences computationnelles. Cette équipe s'intéresse aux mécanismes neuronaux sous-jacents à l'anesthésie générale, le sommeil et la mémoire. Elle utilise pour cela la modélisation mathématique, l'électroencéphalographie et le traitement de signal. Mon stage se place dans le cadre d'une meilleure compréhension de l'activité cérébrale motrice par la technique d'électroencéphalographie.

Chapitre 1

Introduction et problématique

Durant ce stage, j’ai réalisé une étude scientifique dont le but était d’améliorer les connaissances fondamentales sur l’activité cérébrale lors de la réalisation de mouvements simples. L’équipe dans laquelle j’ai travaillé s’intéresse principalement au domaine des interfaces cerveau-ordinateur (ICO), dont le but est de permettre à un utilisateur d’interagir avec un ordinateur en utilisant uniquement son activité électrique cérébrale, sans passer par la moelle épinière, les nerfs et les muscles. Dans ce domaine, l’activité cérébrale produite lors de l’imagination motrice, c’est-à-dire le fait d’imaginer réaliser un mouvement sans réellement l’exécuter, est très intéressante pour contrôler une ICO. Aujourd’hui, on sait que l’activité cérébrale produite durant une imagination motrice est très proche de celle générée lors d’un mouvement réel, et malheureusement, elle reste encore mystérieuse à bien des égards. Les résultats de cette étude, qui porte sur le mouvement volontaire, pourront ensuite être utilisés ultérieurement pour compléter ou améliorer nos connaissances dans le domaine des ICO. Dans cette introduction, nous proposons de rappeler, dans un premier temps, ce qu’est un acte moteur et comment il est possible de conceptualiser un mouvement à l’échelle du cerveau. Dans un deuxième temps, nous aborderons la technique d’électroencéphalographie et nous verrons quelle type d’activité cérébrale celle-ci enregistre. Enfin, la problématique de mon stage sera exposée en abordant la notion d’Event-related Desynchronization (ERD) et d’Event-related Synchronization (ERS).

1.1 Conceptualisation du mouvement à l’échelle cérébrale

Même si à première vue, la réalisation d’un mouvement paraît simple, il suffit de s’y intéresser de plus près pour voir à quel point il dépend de mécanismes complexes. En effet, le mouvement volontaire résulte de l’interaction entre le niveau sensorimoteur et le niveau cognitif du système nerveux, ces deux parties correspondant au système nerveux central (SNC). Par la suite, une transmission au système nerveux périphérique (SNP) va faire passer le message nerveux jusqu’aux muscles auxquels l’ordre moteur a été donné. Le système moteur est généralement défini comme étant l’ensemble de la musculature du corps et des neurones qui commandent la contraction de ces muscles [Shemmell et al., 2010].

1.1.1 Complexité du mouvement à travers un exemple

Il est possible d'illustrer cette complexité avec un exemple très simple, celui d'attraper un verre d'eau. Dans cette situation, pour que le mouvement soit rendu possible, il faut que l'on puisse se repérer dans l'espace, et pour cela, intégrer les informations sensorielles qui indiquent la position de notre corps dans l'environnement et qui permettent de savoir quelle trajectoire doit avoir notre membre supérieur pour atteindre le verre d'eau. Par la suite il faut planifier le mouvement au niveau de la partie antérieure de notre lobe frontal. Cette planification se fait grâce à l'excitation de certains neurones qui vont émettre un potentiel d'action. Le message nerveux est ensuite transmis à l'aire 6 du cortex moteur, représentée par le cortex prémoteur et l'AMS sur la figure 1.2 et qui a pour fonction d'ordonner la contraction de l'ensemble des muscles impliqués dans la réalisation du mouvement que l'on veut faire. L'aire 4 du cortex moteur correspond au lieu de passage suivant de l'influx nerveux. Cette aire va transmettre ce message vers les motoneurones alpha au niveau de la moelle épinière et ce n'est qu'à cet instant que l'information est transmise au SNP. Les motoneurones vont ensuite véhiculer le message jusqu'aux muscles concernés. Enfin, on peut évoquer le rôle important du cervelet dans la coordination et l'harmonisation de ce mouvement volontaire et les ganglions de la base qui le rendent plus précis.

1.1.2 Communication neuronale et transmission synaptique

Pour que le transfert d'information ait lieu de part et d'autre du cerveau de l'Homme, les neurones communiquent entre eux par des synapses, mais cette connexion n'est pas que physique, elle se fait principalement par l'intermédiaire de molécules chimiques au niveau de la fente synaptique. La transmission du message se fait grâce à une entrée de calcium, qui fait suite à la transmission du potentiel d'action vers le bouton synaptique, cela induit la libération de vésicules synaptiques qui contiennent des neurotransmetteurs. Ces neurotransmetteurs vont ensuite se fixer sur des récepteurs spécifiques au niveau post-synaptiques qui vont induire un message nerveux au niveau post-synaptique. Ce message nerveux peut être excitateur ou inhibiteur en fonction des neurotransmetteurs qui se sont fixés sur les récepteurs. Cela se traduit par l'ouverture de canaux ioniques qui font entrer des ions positifs ou négatifs, qui va faire varier le potentiel membranaire et qui va induire une activation ou une inhibition (hyperpolarisation ou dépolarisation de la membrane post-synaptique). Si l'on reprend l'exemple du verre d'eau, il est intéressant de noter que l'ensemble des phénomènes décrits ci-dessus se réalisent en une fraction de seconde, sans que l'on ne s'en rende compte et sans réel effort de notre part. Au cours de ce rapport, nous allons surtout nous concentrer sur la réponse au niveau du SNC sans détailler les mécanismes qui interviennent au niveau du SNP.

1.1.3 Les deux types de mouvements

Il existe deux types de mouvements : le mouvement volontaire et involontaire, ce dernier étant également appelé mouvement réflexe. Le mouvement volontaire se définit comme étant contrôlé et ordonné par l'individu. Ce mouvement est planifié, analysé, traité et ordonné par le SNC, puis transmis à la moelle épinière, ce qui va permettre de donner l'information à l'organe concerné. Dans ce cas, le mouvement

est sélectionné en fonction d'un but défini, sur la base de processus cognitifs internes relatifs à nos expériences antérieures [Haggard, 2005]. A l'inverse, le mouvement réflexe n'est pas ordonné par l'individu, c'est une réponse stéréotypée induite par un stimulus. Cette activité est produite par l'arc réflexe sans intervention concrète du cerveau. Souvent ce sont des actions que l'on réalise sans en avoir conscience ou sans le vouloir. Ces mouvements ont un rôle de protection ou de défense comme par exemple lorsque l'on touche quelque chose de très chaud, la main se retire très vite pour éviter la brûlure. Pour cette étude, nous nous sommes intéressés exclusivement au mouvement volontaire et à l'activité cérébrale produite lors de celui-ci.

1.1.4 Place du cerveau dans le mouvement volontaire

Le cerveau est l'organe qui perçoit, qui pense et qui agit. Pour se faire, des interactions entre les différentes parties du cerveau sont nécessaires. Le cerveau est composé de 5 lobes au total. On distingue 4 lobes externes : le lobe frontal, pariétal, occipital, temporal et un lobe interne, l'insula. Habituellement, on peut associer à chaque lobe une fonction spécifique. En effet, le lobe frontal est souvent relié à l'activité de raisonnement, à l'élaboration de la personnalité et aux phénomènes de conscience. Le lobe temporal permet l'audition, le langage mais est aussi impliqué dans la mémoire et la présence d'émotions. Le lobe occipital est le siège du système visuel et l'insula serait impliqué dans les fonctions d'homéostasies. Dans le cadre de cette étude, c'est le lobe pariétal qui peut être relié au contrôle de l'activité sensorimotrice.

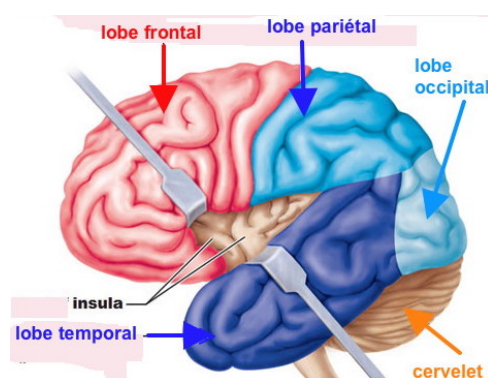


FIGURE 1.1 – Les principaux lobes du cerveau (frontal, pariétal, occipital, temporal et interne). Source : <https://amourhainetpe.wordpress.com/>

Pour la réalisation d'un mouvement volontaire, il y a interaction entre différentes parties du cortex mais nous n'allons pas étudier ces interactions. La partie cérébrale qui nous intéresse dans cette étude est le cortex moteur, plus précisément, l'observation des signaux électriques émis dans la zone de la main droite. Il est important de préciser que la réponse motrice est contralatérale au niveau des hémisphères cérébraux. C'est à dire qu'un mouvement réalisé par la main droite va émettre un signal électrique au niveau de l'hémisphère gauche et inversement.

1.1.5 Le cortex moteur

En 1870, Hitzig et Fritsch ont dessiné les premiers contours de la vision actuelle du cortex moteur en stimulant électriquement certaines parties du cortex cérébral chez le chien [Hagner, 2012]. Ils ont observé que des contractions musculaires pouvaient être provoquées en stimulant la partie antérieure et latérale du cortex cérébral. Cette aire du cortex est plus communément dénommée cortex moteur primaire ou M1 (Figure 1.2). On le situe de part et d'autre du sillon central aussi appelé scissure de Rolando. L'aire au niveau du lobe frontal, est responsable des muscles du corps. Elle est aussi subdivisée en deux parties qui sont le cortex moteur primaire et l'aire motrice supplémentaire (AMS). Cette dernière, est en partie responsable de la planification et de l'initiation des mouvements. L'aire 4 localisée du côté du lobe pariétal, aussi appelé cortex moteur primaire et situé juste en avant du cortex somatosensoriel.

En 1917, les travaux de Sherrington sur le singe ont permis de démontrer que les populations de neurones du cortex moteur primaire présentent une organisation spatiale caractéristique dans laquelle la contraction de chaque segment corporel est contrôlé par un territoire cortical bien défini. C'est ce qui a été confirmé plus tard par Penfield, un célèbre neurochirurgien, qui grâce à l'Homonculus de Penfield, Penfield et Rasmussen, ont montré la présence d'une carte motrice au niveau du cortex moteur primaire [Penfield and Rasmussen, 1952]. La particularité de cette carte motrice est que certaines parties du corps sont plus représentées que d'autres en terme de territoire cortical (Figure 1.3). Par exemple, la zone de la main est plus étendue que celle du bras ou du dos. Pour notre étude, nous nous sommes intéressés principalement à la zone corticale dédiée à la main, qui est assez étendue sur le territoire cortical moteur.

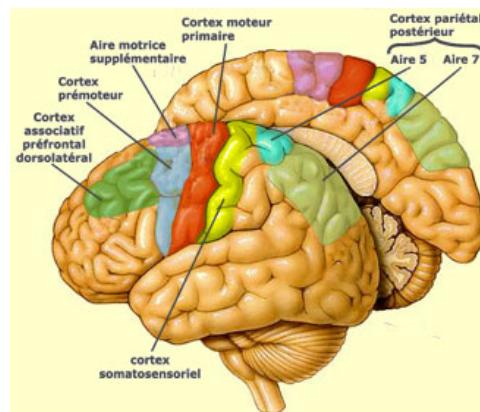


FIGURE 1.2 – Principales régions corticales impliquées dans la motricité volontaire. Source : <https://le-cerveau.mcgill.ca/>

1.2 L'électroencéphalographie

L'électroencéphalographie est une technique assez récente. Elle a été mise en place en 1929, chez l'homme, par le neurologue Hans Berger. Son travail reposait sur les travaux d'autres chercheurs, comme Richard Caton sur les animaux [Mark et al., 2007]. Cette technique est non invasive, facile à mettre en oeuvre et permet la mesure de l'activité électrique cérébrale avec une grande précision temporelle. Par

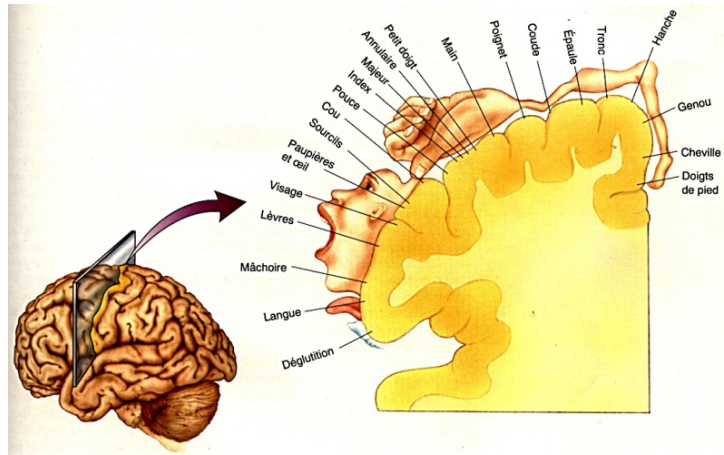


FIGURE 1.3 – Organisation somatotopique du cortex moteur chez l'Homme basée sur l'Homunculus de Penfield. Source : <https://lecerveau.mcgill.ca/>

contre l'EEG présente une faible précision spatiale puisqu'elle ne permet de mesurer que l'activité des neurones qui sont en surface. Les études EEG peuvent se faire en utilisant un certain nombre d'électrodes, celui-ci peut aller de 1 à 256 électrodes.

Cette technique a pour but l'enregistrement des oscillations cérébrales en fonction du temps, à l'aide d'électrodes et d'un amplificateur, ce qui permet de retracer les impulsions électriques sous forme de tracé graphique sur un ordinateur. Il est généralement admis que le signal EEG représente l'activité post-synaptique des neurones pyramidaux des couches corticales 3 à 5 dont l'organisation au niveau de l'anatomie permet une sommation des champs électriques [Gevins et al., 1990].

Des électrodes sont placées sur le cuir chevelu au niveau de zones préalablement définies et cela à l'aide d'un casque qui permet de maintenir les électrodes au bon endroit. Ces électrodes sont reliées à un amplificateur qui va permettre de visualiser les impulsions électriques émises par les neurones pyramidaux des couches corticales en surface. De nos jours cette technique est très utilisée en laboratoire lorsqu'il s'agit de vouloir comprendre le fonctionnement du cerveau. Elle est également utilisée dans le domaine des interfaces cerveau-ordinateur pour permettre la communication de personnes ayant un lourd handicap.

1.2.1 Les neurones pyramidaux

Comme cela a été dit précédemment, le signal EEG est le résultat de l'activité des neurones pyramidaux. Ces neurones pyramidaux sont appelés ainsi à cause de leur forme triangulaire. Les neurones qui nous intéressent pour cette étude se situent entre les couches corticales 3 à 5. Ces neurones ont la particularité de posséder des axones très longs regroupés en faisceaux. Ils vont sortir du cerveau pour rejoindre la moelle épinière pour enfin activer les motoneurones alpha.

1.2.2 Les différents rythmes EEG

Les rythmes cérébraux sont classés selon leur fréquence. Par exemple, cela permet d'identifier certains états d'éveils ou à l'inverse de sommeils. Cette activité neurale est aussi le reflet de la cognition. Il est

même possible de reconnaître certaines tâches cognitives à travers ces signaux électriques. Lors de cette étude nous allons nous focaliser sur une bande de fréquence bien précise qui est spécifique du mouvement volontaire.

On différencie plusieurs plages ou bandes de fréquences et chaque plage est définie par une lettre grecque. Tout d'abord nous avons les rythmes delta qui ont une très faible fréquence, inférieure à 4 Hz, ils représentent les états de sommeil profond. Puis les bandes de fréquence thêta, qui sont comprises entre 4 et 7 Hz et qui sont caractéristiques d'un état de somnolence. Les rythmes qui nous intéressent sont les rythmes alpha, qui sont compris entre 8 et 12 Hz. Ces rythmes sont caractéristiques d'un état de conscience apaisé. Les rythmes bêta nous intéressent aussi, ils sont compris entre 13 et 35 Hz et sont caractéristiques d'un état de concentration intense ou de mouvement. Ce sont les deux principaux rythmes que nous allons étudier. Nous avons aussi les rythmes gamma qui ont une fréquence supérieure à 35 Hz. La Figure 1.4 représente les différents rythmes cérébraux selon leur fréquence.

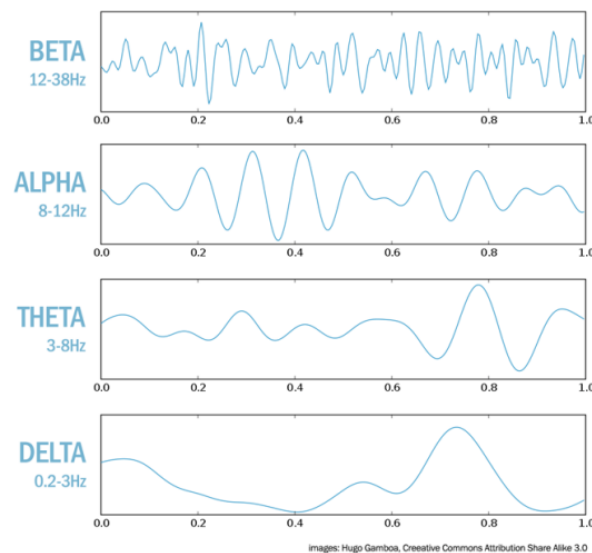


FIGURE 1.4 – Représentation schématique des différents rythmes cérébraux (alpha, bêta, theta et delta).
Source : <http://sommeilparadoxaltpe.blogspot.fr/>

1.2.3 Variation de l'activité cérébrale durant un mouvement volontaire

Depuis 1950, il a été prouvé que la puissance de certains rythmes, c'est-à-dire la représentation de certaines bandes de fréquences, dans le signal EEG pouvait être modifiée selon qu'un mouvement soit effectué par un sujet. Dans ce rapport, nous nous sommes intéressés particulièrement à la présence d'événements au sein de deux rythmes : le rythme alpha (8-12 Hz) et le rythme bêta (15-30 Hz).

Au cours de la réalisation d'un mouvement, des réponses cérébrales différentes sont induites selon les bandes de fréquence observées. Deux types de modulation de la réponse cérébrale peuvent être mises en évidence, les ERDs (Event-Related Desynchronization) et les ERSs (Event-Related Synchronization), comme décrit dans la figure (Figure 1.5). L'ERD apparaît avant et pendant le mouvement et est maintenu aussi longtemps que l'effecteur est en train de bouger [Pfurtscheller, 1977]. Cette désynchronisation est

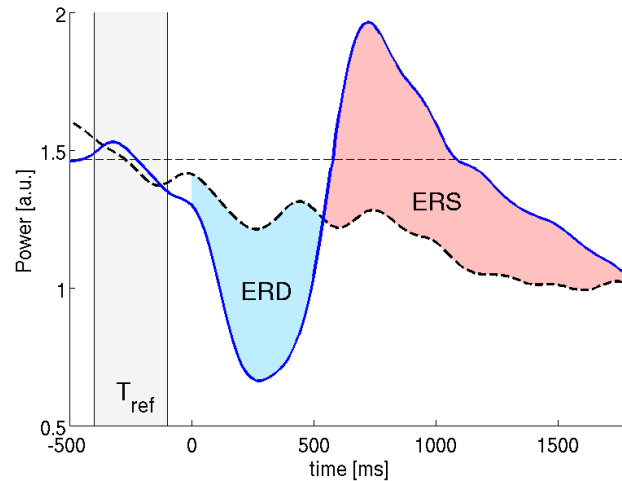


FIGURE 1.5 – Représentation schématique des notions d'Event-Related Desynchronization (ERD) et d'Event-Related Synchronization (ERS). Source : <http://sommeilparadoxaltpe.blogspot.fr/>

définie comme étant une diminution de puissance reflétant un état d'activation dans le cortex sensorimoteur lié à la préparation d'un mouvement des membres. Il est aussi possible qu'elle permette de diminuer les entrées somatosensorielles pour pouvoir effectuer un mouvement de manière plus efficace. Les ERDs ont une plus grande amplitude et sont bien plus visibles dans la bande de fréquence alpha. L'ERS, aussi appelé rebond bêta est un phénomène très robuste et se retrouve chez presque tous les sujets après un mouvement quel-qu'il soit (Event-Related Synchronization), [Pfurtscheller, 1992]. L'ERS est dominant sur la zone sensorimotrice primaire contralatérale et apparaît au maximum une seconde après le mouvement [Pfurtscheller and Lopes da Silva, 1999]. L'ERS apparaît plus spécifiquement dans la bande de fréquence bêta, d'où son nom. D'après [Gaetz and Cheyne, 2006], le rebond bêta permet de faire le lien entre les entrées sensorielles et les sorties motrices. En d'autres termes, après s'être repéré dans l'espace à l'aide de stimuli sensoriels, il est possible d'effectuer un mouvement et cela est permis par le rebond bêta [Kilavik et al., 2013].

1.3 Problématique du stage

D'après la littérature la réponse canonique, qui est définie par un ERD avant le mouvement et un ERS après, qui apparaît lors de la réalisation de mouvements isolés, a un profil d'expression très robuste comme observé dans la figure 1.5. Elle s'étend sur quatre secondes pour un mouvement simple. L'ERD, qui est une diminution de puissance, apparaît lors de la préparation et de la réalisation du mouvement, dure environ 2 secondes. Une fois le mouvement réalisé, une latence de 500 ms permet une transition vers l'ERS (aussi appelé rebond) qui est une augmentation de puissance observée juste après la fin du mouvement et qui dure environ 1 seconde. L'une des hypothèses à vérifier lors de notre étude est de voir si on peut obtenir le profil d'expression de la réponse canonique décrit dans la littérature.

Le profil d'une réponse canonique lors de mouvements isolés étant bien connu, nous nous sommes questionnés sur le devenir de la réponse cérébrale lors de mouvements successifs séparés de différents in-

tervalles plus ou moins long. Certaines études suggèrent que lorsque les mouvements sont trop rapprochés, on observe une modulation de l'amplitude de l'ERD et/ou de l'ERS qui va diminuer. Il est possible que l'ERD du mouvement suivant chevauche l'ERS du mouvement précédent, ce qui entraînera la réduction de son amplitude, mais cette hypothèse reste à vérifier.

Nous nous sommes donc intéressés à cet aspect en mettant en place une première expérience qui consiste à étudier en particulier les mouvements successifs séparés d'intervalles compris entre 0,5 et 3,5 secondes. Les différents essais sont classés dans des intervalles d'une seconde, la première classe étant comprise entre 0,5 et 1,5 secondes, la deuxième 1,5 et 2,5 seconde et la dernière classe entre 2,5 et 3,5 secondes comme décrit dans la figure 2.1. Il faut savoir que pour avoir des résultats significatifs, 40 essais minimum sont nécessaires. Ce point précis nous a empêché d'obtenir des résultats plus précis car il rallonge la durée d'expérience a atteint un seuil maximum.

Pour mieux comprendre les modulations induites par le raccourcissement des intervalles de temps, nous avons donc mis en place une autre expérience, qui elle, se focalise surtout sur des intervalles courts compris entre 0,5 et 1,5 seconde. Dans cette expérience les différents essais sont classés dans des intervalles de 300 millisecondes, donc la première classe est comprise entre 500 millisecondes et 800 millisecondes, la deuxième entre 800 millisecondes et 1,1 seconde, ainsi de suite jusqu'à 1,5 seconde. D'après [?] les stimuli visuels ont un impact sur la réponse cérébrale. La réponse canonique étant robuste, nous nous sommes intéressés aux modulations que peuvent induire sur celle-ci les deux conditions suivantes, que sont les yeux ouverts et les yeux fermés.

Les expériences menées pour vérifier nos hypothèses consisteront à étudier les réponses cérébrales lors de la réalisation de mouvements isolés de l'index droit dans les conditions yeux ouverts puis yeux fermés. L'expérience comprend aussi l'étude des variations du profil canonique lors de la réalisation de mouvements volontaires successifs séparés de différents intervalles de temps.

Chapitre 2

Matériel et méthodes

2.1 Mouvement étudié

La tâche consiste à réaliser des clics de souris isolés ou successifs avec l'index. Ce mouvement simple est défini comme étant une flexion isométrique discrète. Cette flexion est qualifiée d'isométrique car le muscle est en équilibre, il ne se raccourcit pas vraiment. Ce type de mouvement correspond à un mouvement franc où le début et la fin sont bien identifiés et de courte durée.

2.2 Sujets

17 personnes au total ont donné leur accord pour participer à cette étude. Pour la première expérience qui étudiait les réponses canoniques issue de mouvements isolés, en comparant les yeux ouverts et fermés et les mouvements successifs avec des longs intervalles de temps, 5 femmes et 3 hommes ont participé. Pour la deuxième expérience qui étudiait la réponse canonique de mouvements isolés, uniquement avec les yeux fermés et les mouvements successifs séparés d'intervalles courts, 9 hommes se sont portés volontaires. Ces personnes ont tous affirmé vérifier les critères d'inclusions qui sont : être droitiers, avoir entre 18 et 60 ans, ne pas souffrir de dépression, d'épilepsie, de diabète, de fatigue chronique, ne pas avoir eu d'accident vasculaire cérébral, ne pas prendre de traitement anxiolytique ou antidépresseurs et ne pas être dépendant de l'alcool ou de drogues. Tous les participants ont signé un consentement éclairé qui a été rédigé au préalable. Enfin, le protocole de l'expérience a été approuvé par le comité éthique de l'INRIA.

2.3 Expériences

L'instruction donnée aux sujets était de réaliser des flexions isométriques discrètes de l'index droit, soit de manière isolée pour un mouvement unique toutes les 10 secondes, soit de manière successive pour deux mouvements séparés d'un intervalle de temps variable. Le sujet faisait varier cet intervalle de façon aléatoire et volontaire.

Pour notre expérience nous avons choisi un mouvement de la main droite car d'après [?], la réponse cérébrale est équivalente dans les deux hémisphères, à la différence de la main gauche où on a une

activation plus forte au niveau controlatéral. On observe une différence d'apparition du rebond, cela est dû à l'hémisphère dominant et donc lorsque le sujet est droitier ou gaucher une réponse équivalente n'est pas observée.

Les mouvements isolés ou successifs sont réalisés dans des sessions bien distinctes. D'après Pfurtscheller [Pfurtscheller and Lopes da Silva, 1999], entre chaque tâche le sujet doit attendre environ 10 secondes pour pouvoir réaliser une nouvelle tâche, cela permet à la réponse cérébrale de revenir au repos. D'autres chercheurs ont émis l'hypothèse que la période après le mouvement peut être utilisée par le cortex sensorimoteur pour recalibrer ou restaurer le système moteur pour de nouvelles conditions dans le but de préparer le mouvement ultérieur, cela explique la nécessité de cet intervalle de temps qui sépare les différentes tâches motrices [Kilavik et al., 2013].

Cependant, dans notre expérience, il n'y a pas de stimulation sonore qui permet de prévenir le sujet qu'il peut à nouveau réaliser un mouvement, donc cet intervalle de 10 secondes est laissé à l'appréciation du sujet. L'absence de bip sonore est expliqué par le fait qu'aucune perturbation sensorielle ne doit influencer le sujet afin de vérifier le fait que le mouvement est bel et bien volontaire et non pas ordonné par une stimulation quelconque. Une étude récente qui utilise des courants rythmiques de stimuli auditifs a découvert une puissance bêta qui augmente dans les zones motrices juste avant chaque événement sonore ce qui est susceptible de perturber le signal moteur attendu [Kilavik et al., 2013].

Pour l'étude de l'effet du mouvement volontaire sur les oscillations cérébrales nous avons mis en place deux expériences.

2.3.1 Expérience 1

Lors de la première expérience les intervalles de temps entre chaque tâche étaient comprises entre 0,5 et 3,5 secondes comme décrit sur la figure 2.1.

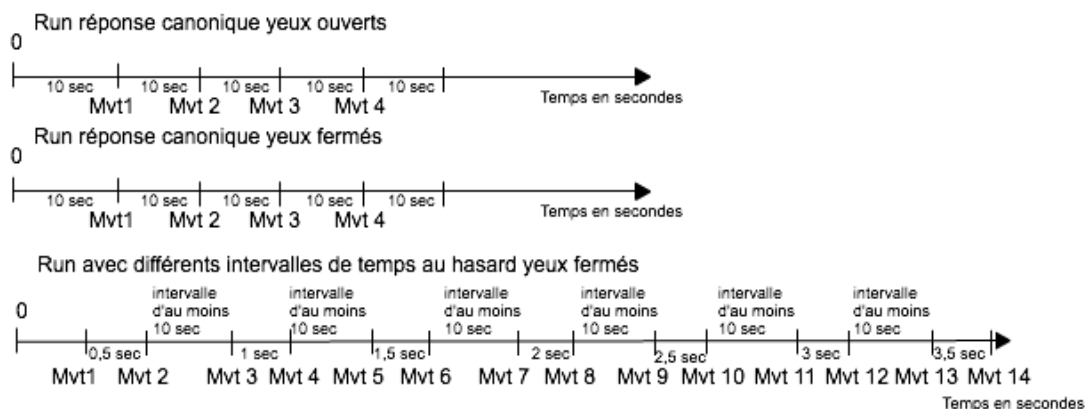


FIGURE 2.1 – Représentation schématique globale de l'expérience 1 et des différentes tâches expérimentales à réaliser dans deux conditions yeux ouverts et yeux fermés.

Les tâches à réaliser sont de 3 types :

- Réponse canonique qui correspond à des mouvements isolés séparés les uns des autres par un intervalle de plus ou moins 10 secondes. Cette tâche est à réaliser les yeux ouverts en fixant un

point placé sur le mur en face du sujet.

- Réponse canonique qui correspond à la même tâche que la précédente mais celle-ci est à réaliser les yeux fermés.
- Deux mouvements successifs séparés d'un intervalle variable allant de 0,5 seconde à 3,5 secondes. Chaque série de deux mouvements est séparée par un intervalle d'au moins 10 secondes afin de permettre à la réponse cérébrale de revenir à son état de repos.

Lors de l'expérience, nous avons réalisé au total 16 sessions, de 4 minutes environ, de chaque tâche. 3 sessions correspondent aux réponses canoniques avec les yeux ouverts, 3 aux réponses canoniques avec les yeux fermés et 10 sessions correspondent aux mouvements successifs séparés d'un intervalle avec les yeux fermés. L'ordre de ces différentes sessions a été défini de manière aléatoire sur Excel.

2.3.2 Expérience 2

Lors de la deuxième expérience, nous nous sommes intéressés à des intervalles de temps entre chaque mouvement, plus courts et donc compris entre 0,3 et 1,5 secondes comme décrit dans la figure 2.2. Pour cette expérience nous avons retiré la réponse canonique les yeux ouverts car la première expérience nous a fourni assez d'essais pour en déduire la tendance de la réponse cérébrale correspondant à ce mouvement.

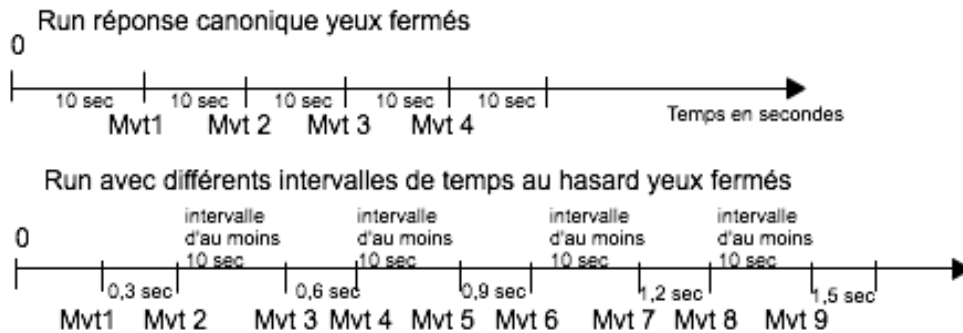


FIGURE 2.2 – Représentation schématique globale de l'expérience 2 et des différentes tâches expérimentales à réaliser dans la condition et yeux fermés.

Les tâches à réaliser sont de 2 types :

- Réponse canonique qui correspond à des mouvements isolés séparés les uns des autres par un intervalle de plus ou moins 10 secondes. Cette tâche est à réaliser les yeux fermés.
- Deux mouvements successifs séparés d'un intervalle variable allant de 0,3 seconde à 1,5 secondes. Chaque série de deux mouvements est séparée par un intervalle d'au moins 10 secondes afin de permettre à la réponse cérébrale de revenir à son état de repos.

Lors de l'expérience, nous avons réalisé au total 16 sessions, de 4 minutes environ, de chaque tâche. 3 sessions correspondent aux réponses canoniques avec les yeux fermés et 13 sessions correspondent aux mouvements successifs séparés d'un intervalle avec les yeux fermés. L'ordre de ces différentes sessions a été défini de manière aléatoire sur Excel de la même manière que précédemment.

2.4 Procédure

2.4.1 Mise en place de l'expérience

Tout d'abord avant de commencer l'expérience, il faut faire signer au sujet un document d'information, le consentement éclairé, qui résume l'expérience, ses droits et les retours possibles de l'étude. Après cela l'expérience peut commencer. Il faut choisir la bonne taille de casque en mesurant le tour de tête du sujet. Ensuite il faut placer le casque EEG correctement. Il faut en particulier centrer l'électrode Cz qui se trouve au centre du crâne. Pour cela, il faut mesurer la distance entre le nasion, qui est à la base du nez entre les sourcils et l'inion qui est à l'arrière du crâne. Il faut aussi centrer cette électrode perpendiculairement, pour cela on mesure aussi la distance entre les deux lobes d'oreilles. Une fois que l'électrode Cz est bien centrée, on peut commencer à remplir de gel l'emplacement des électrodes que l'on veut mesurer. On remplit une seringue en plastique de gel électrolytant qui permet d'améliorer la conduction du courant. Donc cela permet d'avoir un passage plus efficace des décharges électriques produites par les neurones de surface vers les électrodes. On place la seringue à l'emplacement de l'électrode que l'on veut et on pousse les cheveux en faisant des cercles avec la seringue pour atteindre le cuir chevelu. Une fois le cuir chevelu atteint, on peut remplir cet emplacement avec le gel électrolytant. Lorsque tous les emplacements des électrodes voulues sont remplis de gel, on peut placer les électrodes sur le casque EEG.

2.4.2 Vérification du signal EEG

Après avoir placé les électrodes, il faut vérifier que le courant passe bien et qu'il n'y a pas de résistance des cheveux ce qui peut créer du bruit de fond dans le signal mesuré. On vérifie cela en regardant le signal obtenu sur le logiciel d'acquisition (Actiview Biosemi) et en vérifiant que les impédances ne dépassent pas $10\text{ k}\Omega$. L'équipe possède plusieurs systèmes d'acquisition électroencéphalographiques des sociétés EPOC, TMSi, Micromed et Biosemi. J'ai utilisé l'amplificateur Biosemi durant mon stage. Si le signal observé sur le logiciel n'est pas bon, il faut refaire les électrodes bruitées en poussant correctement les cheveux et en rajoutant du gel électrolytant.

2.4.3 L'électromyogramme

L'amplificateur Biosemi permet aussi d'enregistrer l'activité musculaire grâce à des électrodes externes placées là où on souhaite mesurer l'activité musculaire. Nous avons utilisé 2 électrodes externes. La première qui est nommée Ext 1 correspond à une d'électrode d'électromyographie (EMG) qui permet de mesurer l'activité musculaire de l'index. Il faut donc la placer dans la zone où le muscle de l'index se contracte. Il faut aussi vérifier que le signal émis par cette électrode est bien visible et peut être détecté clairement par le logiciel OpenViBE¹ qui permet de présenter des stimulations et d'enregistrer les signaux. Si le signal n'est pas bien visible, il faut replacer l'électrode à un endroit où l'activité musculaire est plus marquée. L'EMG nous permet de détecter s'il y eu plusieurs mouvements qui ne doivent pas être pris en compte lors de la représentation des résultats et cela nous permettra d'écarter ces mouvements qui

1. <http://openvibe.inria.fr>

fausseraient nos résultats. La deuxième électrode externe, nommée Ext 2, nous permet de référencer toutes nos électrodes par rapport à cette électrode. L'électrode Ext 2 est placée sur une zone éloignée de l'activité motrice, qui est plutôt neutre, et qui se situe au niveau de la mastoïde, c'est l'électrode de référence.

2.4.4 Conditions expérimentales

Le sujet s'installe dans une chaise confortable et ses pieds sont posés sur un repose pied. Il est important que le sujet soit bien installé car l'expérience dure 2 heures et demie environ et pendant la réalisation de la tâche il doit rester immobile, cela permet de réduire la fatigue de celui-ci et les artefacts musculaires qui perturbent très fortement l'EEG. Son avant-bras doit reposer sur le support de la chaise afin qu'il n'y ait pas de contraintes musculaires qui gêneraient le sujet. Entre les différentes sessions de mouvements, il est important de faire des pauses et de faire bouger le sujet. Ces pauses sont importantes car le sujet reste assez longtemps immobile, cela lui permet de se dégourdir les jambes et de se maintenir éveillé, car la plupart des tâches demandées sont à réaliser les yeux fermés pour éviter les artefacts. L'installation trop confortable du sujet a pour désavantage d'induire un état de relaxation intense.

2.4.5 Apprentissage de la tâche expérimentale

Avant la session d'enregistrement l'expérimentateur explique les différentes tâches que le sujet aura à réaliser. Ensuite le sujet teste les différents intervalles (10 secondes séparant chaque mouvement ou les intervalles allant de 0,3 à 3,5 secondes) en fermant les yeux, car lorsque l'on ferme les yeux la notion du temps est différente de celle perçue les yeux ouverts. Pendant que le sujet essaie les différents intervalles, l'expérimentateur donne oralement les différents temps réalisés afin que le sujet puisse s'orienter pendant l'expérience. Une fois cette étape réussie l'expérience peut commencer.

2.5 Analyse des données

Pour analyser les données nous avons utilisé le logiciel matlab, mais pour cela il nous fallait convertir les données en extension ".mat". Les enregistrements étaient enregistrés par le logiciel OpenVibe en format ".ov" puis il fallait les convertir en ".gdf" avant de pouvoir les convertir en ".mat". Pour faire cela, nous avons réalisé un script sous forme de boucle qui permet de convertir tous les fichiers d'un sujet pour une session donnée. Cela nous a permis de gagner du temps et d'éviter les erreurs possibles lors des différentes étapes de conversion du fichier. Une fois les fichiers dans le bon format, les données peuvent être traitées puis visualisées.

Pour analyser les résultats nous devons d'abord isoler chaque mouvement en définissant un intervalle qui est de 2 secondes avant le mouvement et 8 secondes après le mouvement, on appelle cela l'epoching. Ensuite il faut définir certains paramètres pour filtrer nos données dans la bande de fréquence qui nous intéresse grâce à un filtre passe-bande de type "butterworth". La bande de fréquence que l'on veut étudier est comprise entre 8 et 12 Hz pour les oscillations alpha et entre 28 et 35 Hz pour la bande de fréquence bêta. De plus, il faut faire la moyenne de la puissance des échantillons de

tous les essais [Pfurtscheller and Lopes da Silva, 1999]. Il faut aussi définir la baseline qui nous permet de déterminer nos ERD et nos ERS. Le plus souvent c'est une modulation de puissance dans une bande de fréquence, référencée par rapport à une baseline prise juste avant le mouvement. Cette puissance est notée ERD/ERS. L'ERD/ERS est obtenu avec une formule mathématique définie par [Pfurtscheller and Lopes da Silva, 1999]. La baseline, est une période de repos avant chaque essai où il ne se passe rien, qui permet de normaliser notre signal et de calculer le taux ERD/ERS. Elle est choisie 2 secondes avant le mouvement. Après avoir filtré nos données il faut les élever à la puissance carré puis normaliser par rapport à la baseline qu'on met aussi au carré.

Afin de retirer les biais induits par les autres électrodes ainsi que par le moyennage réalisé avec l'électrode de référence et de récupérer un signal plus correct nous avons réalisé un grand Laplacien. La méthode du grand Laplacien consiste à soustraire à l'activité de l'électrode voulue, l'activité des quatre électrodes qui l'entourent afin d'obtenir un signal plus propre. Cette méthode ne peut être réalisée que sur les électrodes qui sont entourées par d'autres électrodes, pour les électrodes qui se trouvent en bordure cette méthode ne peut être appliquée.

La formule pour déterminer les ERD et ERS est :

$$ERD/ERS = (Signal^2 - Baseline^2)/Baseline^2 \quad (2.1)$$

Enfin pour la représentation des résultats nous nous sommes surtout concentrés sur l'électrode C3 qui est l'électrode centrale du cortex moteur et qui reflète la zone corticale motrice de la main droite. Par conséquent toutes les courbes représentées seront basées sur le signal recueilli au niveau de l'électrode C3.

Chapitre 3

Résultats

Pour présenter les résultats de nos expériences, nous nous sommes servis de l'outil informatique matlab qui nous a permis de gérer des très grandes matrices de données, sachant que la fréquence d'échantillonnage que nous avons utilisé lors de l'expérience était de 2048 Hz. Par conséquent le signal enregistre 2048 points par seconde. Les figures qui vont être présentées ci-dessous correspondent aux moyennes de tous les essais réalisés pour une tâche donnée de chaque sujet individuellement. La courbe en gras quant à elle, représente la tendance globale de la tâche motrice observée en moyennant les courbes de tous les sujets. Le moyennage permet de supprimer les variabilité entre individus et d'obtenir une courbe plus lisse. Il est important de préciser que toutes les courbes présentées ne représentent que l'activité cérébrale au niveau de l'électrode C3 qui correspond à la zone corticale représentative de la main droite sur le cortex moteur.

3.1 Comparaison des réponses canoniques

Tout d'abord, il est intéressant de regarder les différences entre les profils des réponses canoniques, c'est-à-dire des mouvements isolés, avec les yeux ouverts et les yeux fermés dans les bandes de fréquence alpha et bêta. Les résultats représentant la réponse canonique avec les yeux fermés pour les deux expériences, ont été rassemblés en une seule figure. La figure 3.3 correspond aux réponses canoniques dans les bandes de fréquence alpha (8-12 Hz) et la figure 3.1 correspond à ces mêmes réponses mais dans les bandes de fréquence bêta (18-25 Hz).

3.1.1 Réponse canonique yeux fermés dans l'alpha et le bêta

Pour la réalisation de ces deux courbes le sujet 8 de l'expérience 1 a été écarté à cause de son profil cérébral anarchique qui biaisait les résultats. Sur la figure 3.3, avant le mouvement, l'ERD n'est pas présent pour la bande de fréquence alpha. Une légère augmentation de puissance est observée. Cette augmentation arrive jusqu'à 20 % et se stabilise 2 secondes après le mouvement. Ce faible rebond observé est dû à une très grande variabilité inter-individuelle pour le rebond bêta. Pour 3 sujets, un rebond bêta très élevé, compris entre 60 et 80%, est observé et pour d'autres il n'est quasiment pas présent. Pour cette bande de fréquence, on voit sur la figure que les ERS n'apparaissent pas au même moment selon

les sujets. Certains atteignent une amplitude maximale une seconde après le mouvement et d'autres sont plus proches de 2 secondes après le mouvement.

La figure 3.1 pour les bandes de fréquence bêta, ne présente quasiment pas de désynchronisation avant le mouvement. Par contre on observe une synchronisation qui a une amplitude presque deux fois plus grande que celle observée pour les bandes de fréquence alpha. Ce rebond bêta atteint son maximum d'amplitude environ 1,5 seconde après le mouvement. Par la suite, la puissance diminue progressivement pour revenir à une valeur de repos. La réponse cérébrale dans les bandes de fréquence bêta a un profil très similaire entre les différents sujets. L'amplitude maximale des rebonds bêta des différents sujets se trouve dans la même zone temporelle et cela nous a permis d'obtenir une courbe assez lisse.

3.1.2 Réponse canonique yeux ouverts dans l'alpha et le bêta pour l'expérience 1

Dans la bande de fréquence alpha, pour la réponse canonique avec les yeux ouverts, observé sur la figure 3.4, la variation de puissance observée n'est pas très significative mais tous les sujets suivent à peu près le même profil. Une légère augmentation de puissance est observée une seconde avant le mouvement et atteint son amplitude maximale au moment de l'exécution du mouvement. Ensuite on a un retour à une valeur de repos puis une autre augmentation de puissance qui atteint son maximum, qui n'atteint pas 20 %, vers 3 secondes après le mouvement.

La réponse canonique avec les yeux ouverts, pour les bandes de fréquence bêta, sont présentées dans la figure 3.2. Dans cette condition expérimentale l'ERD n'est toujours pas présent avant le mouvement. Cependant, un ERS bien net apparaît chez tous les sujets après le mouvement. Cet ERS atteint une amplitude maximale de 40 % environ 1,5 seconde après le mouvement puis redescend progressivement pour revenir à une valeur de repos.

3.1.3 Comparaison des réponses canoniques yeux ouverts et yeux fermés

La figure 3.5 nous permet de comparer la réponse canonique dans les deux conditions que sont les yeux ouverts et les yeux fermés. L'amplitude de la réponse canonique yeux fermés est 3 fois plus élevée que l'amplitude de la réponse canonique yeux ouverts. Un impact des stimuli visuels est donc mis en évidence dans cette figure.

3.2 Comparaison des réponses cérébrales lors de mouvements successifs séparés d'intervalles longs

Durant l'expérience 1, les intervalles séparant deux mouvements successifs étaient des intervalles longs allant de 0,5 à 3,5 secondes tel qu'ils sont représentés avec différentes couleurs sur la figure 3.6. Dans cette expérience dans aucune des conditions, un véritable ERD qui précède le mouvement n'est observé, ce qui est cohérent pour les bandes de fréquence bêta mais pas pour les bandes de fréquence alpha où son amplitude est sensée être plus élevée. La réponse canonique observée dans la condition yeux ouverts

sur cette figure ne présente quasiment pas de désynchronisation ainsi qu'une très légère synchronisation qui représente une puissance ERD/ERS d'environ 10 %. Dans le cas de la réponse canonique avec les yeux fermés, comme précédemment, l'ERD n'est pas présent. Par contre celle-ci présente un ERS bien développé, qui commence légèrement à se former avant le début du mouvement et atteint son maximum environ 1 seconde après le mouvement. L'amplitude du rebond est presque quatre fois plus forte les yeux fermés par rapport aux yeux ouverts, elle atteint une puissance maximale ERD/ERS d'environ 37 %.

- Pour l'intervalle qui est compris entre 2,5-3,5 secondes, une synchronisation est observée, elle commence très légèrement avant le mouvement, environ 300 millisecondes avant et atteint son maximum de puissance ERD/ERS vers 15%. Ensuite une diminution de puissance est observé à la suite du premier mouvement, qui va être interrompu par l'arrivée du deuxième mouvement qui induit une nouvelle synchronisation.
- Pour l'intervalle 1,5-2,5 secondes, la même chose que précédemment est observée pour l'ERS, il apparaît environ 1 seconde avant le mouvement, mais cette fois-ci l'amplitude de l'ERS est plus faible, elle atteint son maximum vers 13%. Cette synchronisation se maintient environ 500 millisecondes après le deuxième mouvement puis diminue légèrement avant de se stabiliser. Il est intéressant de noter que la diminution de puissance qui faisait suite au premier mouvement, dans les intervalles plus longs que sont 2,5-3,5 sec, n'apparaît plus dans cet intervalle.
- Pour le dernier intervalle 0,5-1,5 seconde, l'ERS observé, atteint son maximum d'amplitude à la puissance ERD/ERS 17%. Cette synchronisation commence avant l'initiation du premier mouvement comme pour les réponses précédentes, soit environ 1 seconde avant. Le mouvement suivant induit une nouvelle synchronisation très légère et empêche la synchronisation de diminuer très rapidement, elle se stabilise pendant quelques secondes. Dans cet intervalle, la diminution de puissance qui suit le premier mouvement est complètement abolie.

Les intervalles de cette expérience montrent une tendance globale de modulation de la puissance ERD/ERS. Plus on rapproche les mouvements et plus l'amplitude de l'ERS est faible et la diminution de puissance qui apparaît après un mouvement est abolie lorsque les mouvements sont trop rapprochés. Cela nous a amené à vouloir préciser ces modulation et cela avec l'expérience suivante qui présente des intervalles plus courts et dont les résultats sont présentés dans la figure 3.7.

3.3 Comparaison des réponses cérébrales lors de mouvements successifs séparés d'intervalles courts

Cette deuxième expérience consistait à se focaliser sur les intervalles courts séparant deux mouvements successifs compris entre 0,3 et 1,5 seconde. Ces intervalles sont représentés sur la figure 3.7 par des bandes de couleurs spécifiques à chaque intervalle qui représentent la zone approximative d'apparition du deuxième mouvement.

- Pour les intervalles les plus longs de cette expérience compris entre 1,4-1,7 seconde, le début de l'ERS commence environ 500 millisecondes avant le mouvement puis une diminution de la puissance

ERD/ERS est observée avant le deuxième mouvement. Ce mouvement induit une nouvelle synchronisation qui est différée dans le temps, environ 3 sec après le deuxième mouvement et qui a une amplitude beaucoup plus grande que la première. Cet ERS atteint son maximum d'amplitude vers une puissance ERD/ERS de 33%.

- Pour les intervalles compris entre 1,1-1,4 seconde, une synchronisation après le mouvement est toujours présente, mais de plus faible amplitude que la précédente, cependant celle-ci ne redescend pas de façon significative à cause de l'initiation du second mouvement qui ne permet pas cette diminution, due à l'apparition précoce du mouvement suivant. Une deuxième synchronisation en continuité avec la première est induite par ce deuxième mouvement, mais elle est aussi de plus faible amplitude par rapport à l'intervalle précédent. Il est aussi intéressant de noter que l'augmentation de puissance ERD/ERS se maintient environ 3 secondes après le deuxième mouvement et atteint une amplitude maximale d'environ 25%.
- Pour les intervalles légèrement plus courts, compris entre 0,8-1,1 seconde, un ERS apparaît en même temps que le premier mouvement, atteint son maximum d'amplitude vers 17% et ce maximum coïncide avec l'arrivée du second mouvement. Ce mouvement n'induit pas immédiatement une nouvelle synchronisation, il y a une légère diminution de la réponse cérébrale suivie d'une nouvelle synchronisation qui apparaît plus tardivement. Cette deuxième synchronisation atteint un maximum à la puissance ERD/ERS de 10% vers 2,5 secondes après le deuxième mouvement.
- Enfin pour les intervalles les plus courts compris entre 0,5-0,8 seconde, l'ERS qui faisait suite au mouvement n'est quasiment plus visible. Cependant il est possible de distinguer de très légères augmentations de puissance qui apparaissent beaucoup plus tard que le premier mouvement. Ils sont séparés par une légère diminution de puissance ERD/ERS et ont une amplitude très faible.

Ces observations nous permettent d'émettre certaines hypothèses quant à la modulation de la réponse cérébrale lorsque l'on rapproche de plus en plus les mouvements. Dans ce cas précis, plus les mouvements sont rapprochés plus l'amplitude de l'ERS diminue et la réponse cérébrale arrive plus tardivement ou est décalée dans le temps quand les mouvements sont trop proches.

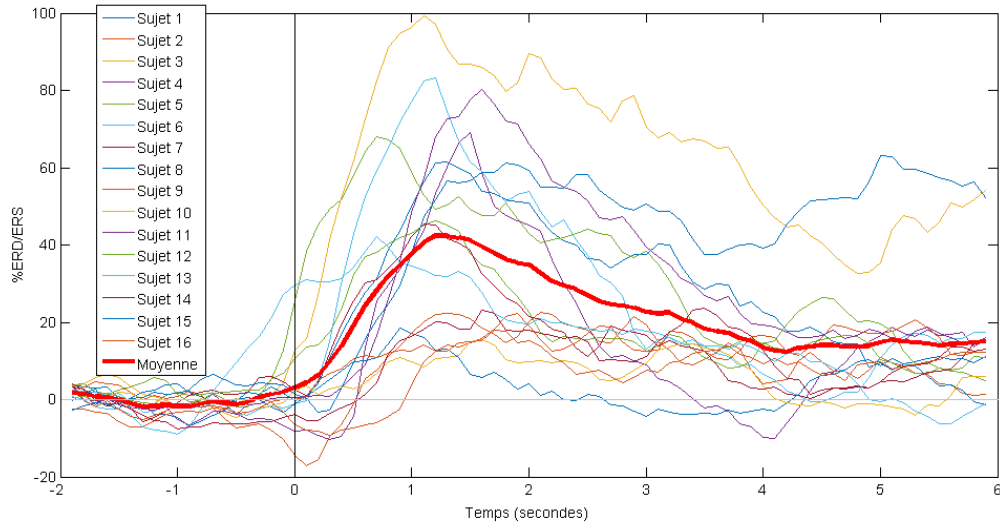


FIGURE 3.1 – Courbe présentant la réponse canonique, dans la condition yeux fermés, dans la bande de fréquence bêta (18-25 Hz) pour 16 sujets des expériences 1 et 2. Sur l'axe des ordonnées la puissance des ERD/ERS en % est représentée. Sur l'axe des abscisses est représenté le temps en secondes. Le temps zéro correspond au mouvement.

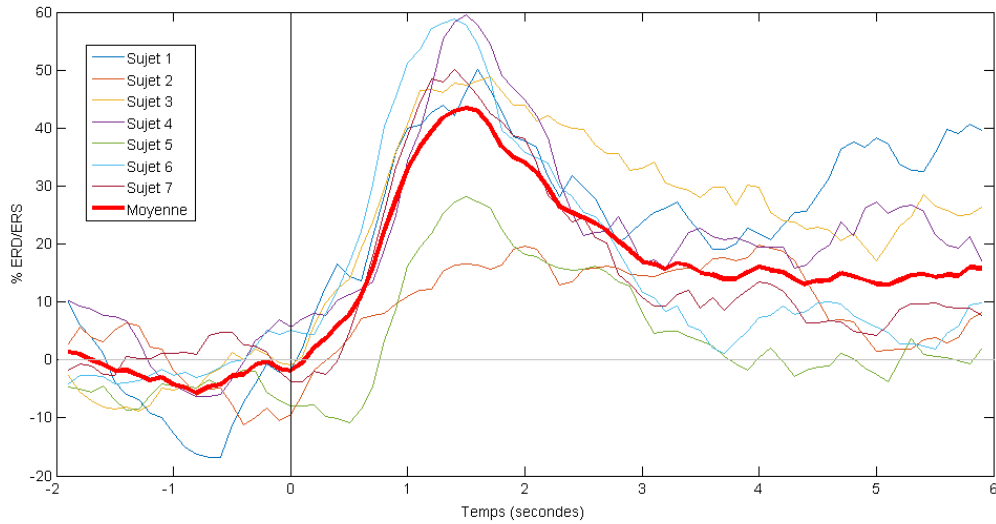


FIGURE 3.2 – Courbe présentant la réponse canonique, dans la condition yeux ouverts, dans la bande de fréquence bêta (18-25 Hz) pour 8 sujets dans l'expérience 1. Sur l'axe des ordonnées la puissance des ERD/ERS en % est représentée. Sur l'axe des abscisses est représenté le temps en secondes. Le temps zéro correspond au mouvement.

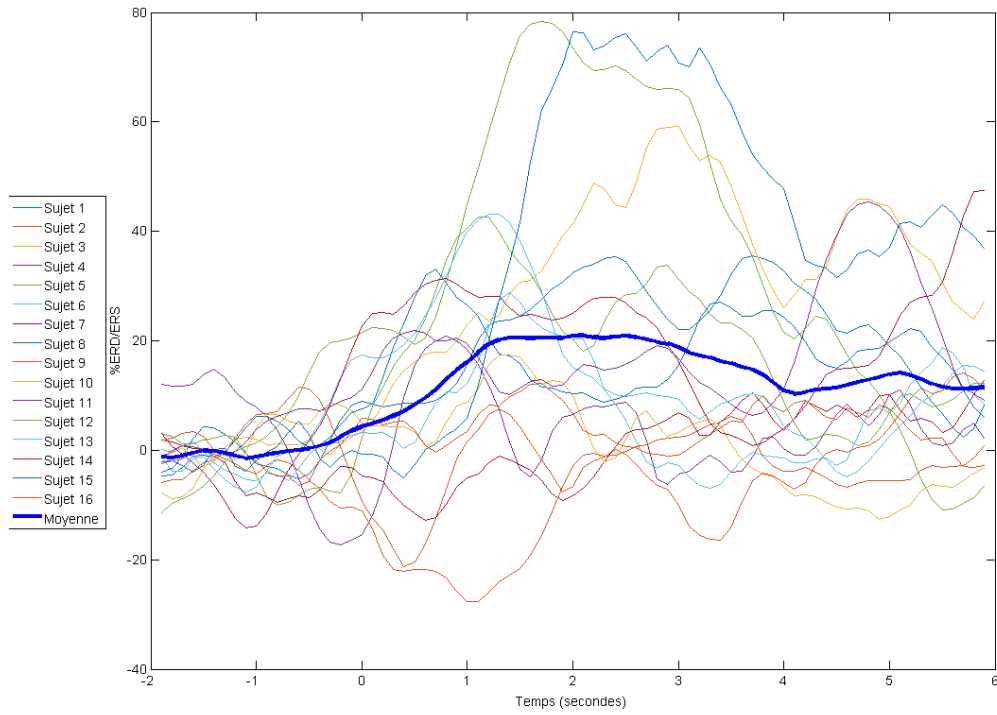


FIGURE 3.3 – Courbe présentant la réponse canonique, dans la condition yeux fermés, dans la bande de fréquence alpha (8-12 Hz) pour 16 sujets des expériences 1 et 2. Sur l'axe des ordonnées la puissance des ERD/ERS en % est représentée. Sur l'axe des abscisses est représenté le temps en secondes.

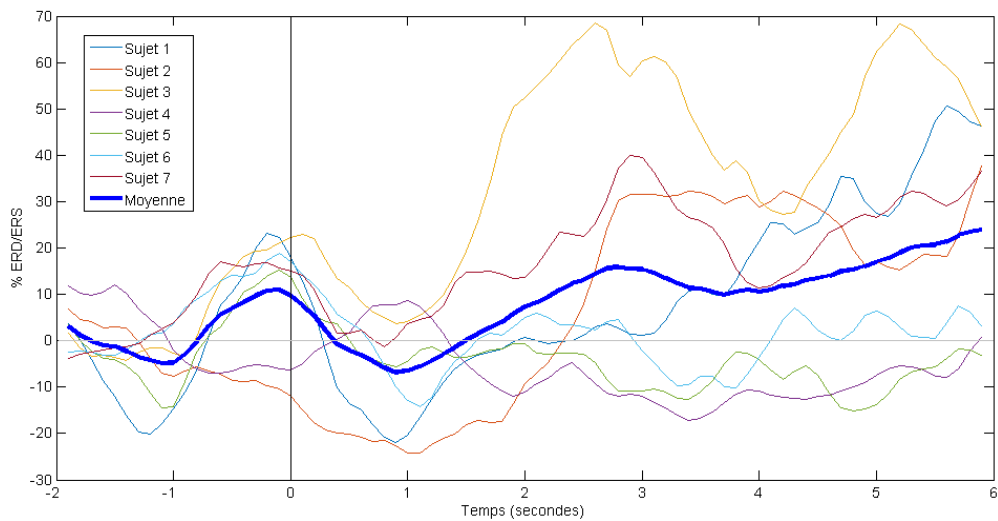


FIGURE 3.4 – Courbe présentant la réponse canonique, dans la condition yeux ouverts, dans la bande de fréquence alpha (8-12 Hz) pour 8 sujets dans l'expérience 1. Sur l'axe des ordonnées la puissance des ERD/ERS en % est représentée. Sur l'axe des abscisses est représenté le temps en secondes. Le temps zéro correspond au mouvement.

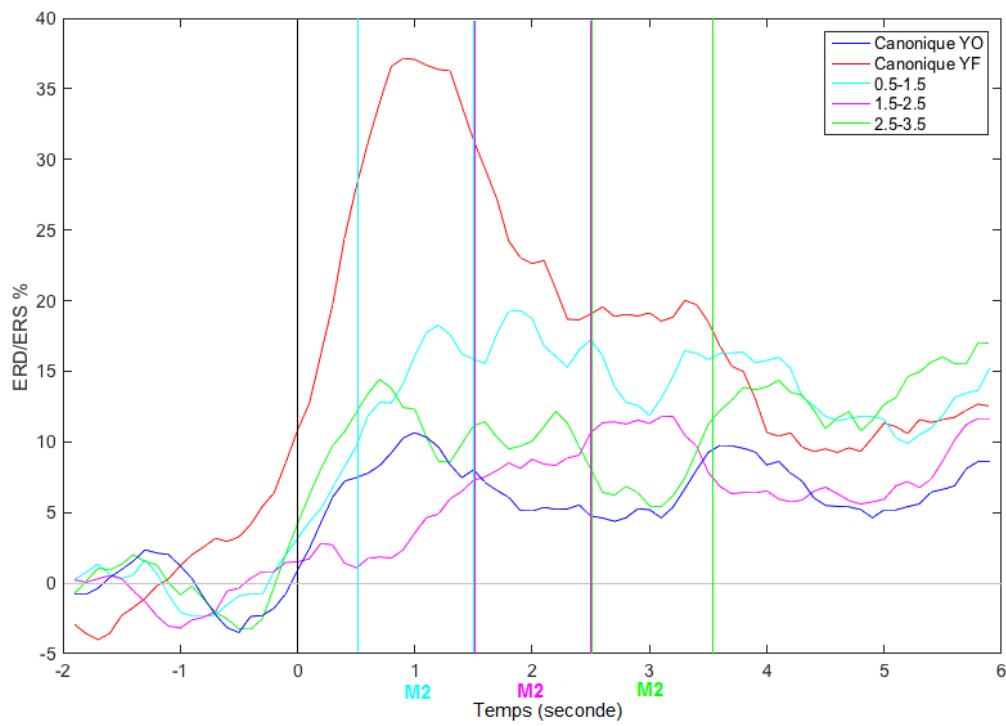


FIGURE 3.5 – Courbe représentant la superposition des différentes tâches réalisées au cours de l'expérience 1. Sur l'axe des abscisses le zéro représente le mouvement des réponses canoniques ou le premier mouvement de l'expérience des intervalles variables entre deux mouvements successifs.

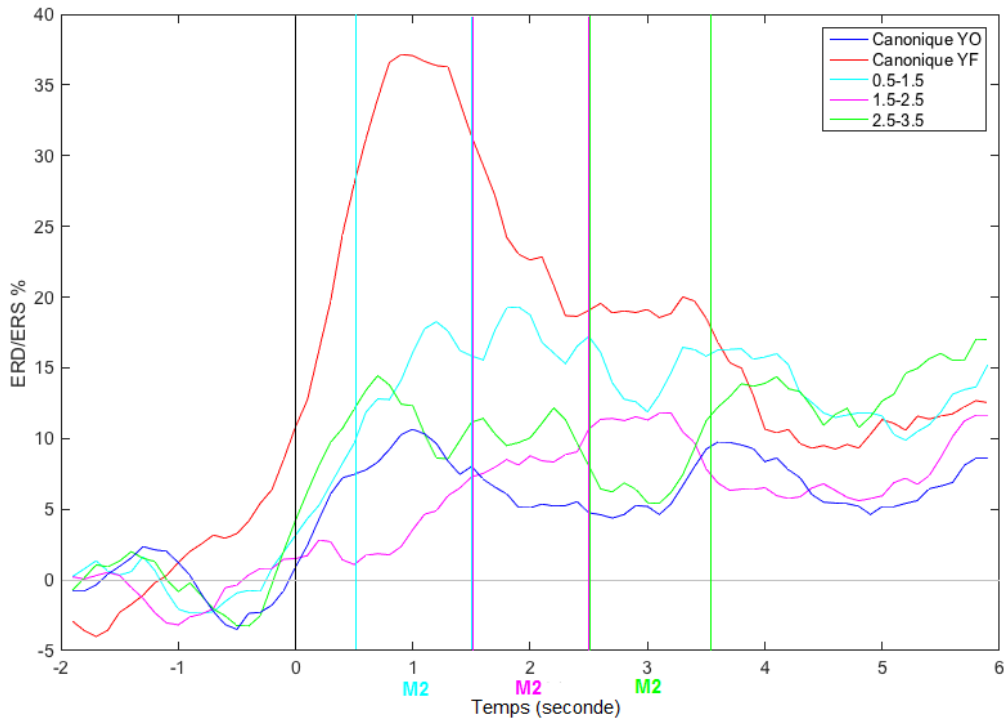


FIGURE 3.6 – Courbe de l’expérience 1, réalisée sur 8 sujets, représentant la comparaison des réponses cérébrales dans la bande de fréquence bêta (18-25 Hz) en fonction des différentes tâches expérimentales à réaliser et des différentes conditions expérimentales. Les conditions expérimentales observées sont les réponses canoniques de mouvements isolés, réalisées les yeux ouverts (YO) et fermés (YF). Sont aussi représentés sur cette figure les réponses cérébrales issues des différentes classes qui correspondent aux intervalles longs qui séparent deux mouvements successifs que sont 0,5-1,5 seconde, 1,5-2,5 secondes et 2,5-3,5 secondes. Sur l’axe des abscisses le temps zéro correspond au mouvement pour les réponses canoniques, ou au premier mouvement pour les mouvements successifs. Sur cet axe M2 correspond à l’initiation du deuxième mouvement sachant qu’il n’est pas possible d’initier le deuxième mouvement pour tous les sujets en même temps en sans repère sensoriel (comme un bip sonore). Les bandes colorées correspondent donc à l’arrivée approximative du deuxième mouvement qui se situe dans cette zone temporelle.

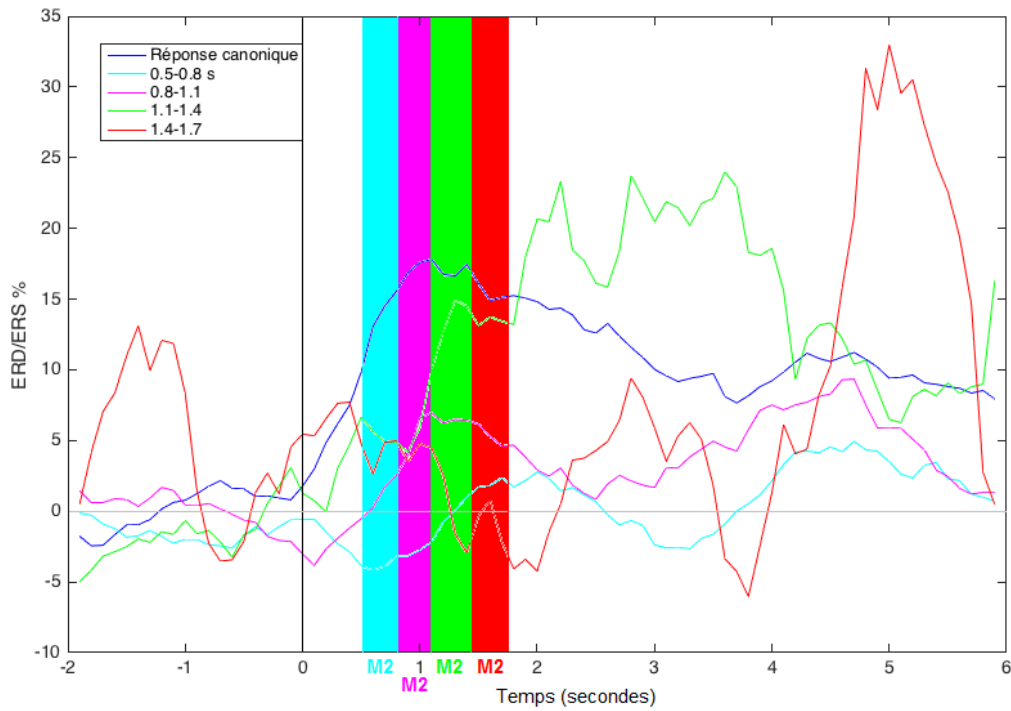


FIGURE 3.7 – Courbe de l'expérience 2, réalisée sur 9 sujets, représentant la comparaison des réponses cérébrales dans la bande de fréquence bêta (18-25 Hz). Les conditions expérimentales observées sont les réponses canoniques yeux fermés uniquement. Sont aussi représentées sur cette figure les réponses cérébrales issues des différentes classes qui correspondent aux intervalles courts qui séparent deux mouvements successifs qui sont 0,5-0,8 seconde, 0,8-1,1 seconde, 1,1-1,4 seconde et 1,4-1,7 seconde. Sur l'axe des abscisses le temps zéro correspond au mouvement pour les réponses canoniques, ou au premier mouvement pour les mouvements successifs. Sur cet axe M2 correspond à l'initiation du deuxième mouvement sachant qu'il n'est pas possible d'initier le deuxième mouvement pour tous les sujets en même temps en sans repère sensoriel (comme un bip sonore). Les bandes colorées correspondent donc à l'arrivée approximative du deuxième mouvement qui se situe dans cette zone temporelle.

Chapitre 4

Discussions et perspectives

L'un des objectifs de notre étude était de dégager le profil canonique lors d'un mouvement volontaire isolé afin d'obtenir les ERDs et les ERSs attendus dans la littérature. Le second objectif était de comparer la réponse cérébrale obtenue lors d'une réponse canonique entre les conditions yeux ouverts et yeux fermés. Le dernier objectif de cette étude était de voir comment la réponse cérébrale se comportait lorsque les sujets réalisaient les mouvements successifs avec des intervalles de plus en plus rapprochés.

Les résultats obtenus ont permis d'observer l'ERS mais pas l'ERD qui sont normalement tous les deux caractéristiques de la réponse canonique. Précédemment nous avons pu émettre certaines hypothèses et vérifier certaines caractéristiques des réponses cérébrales déjà établies dans la littérature. Cependant elles ne sont pas toutes cohérentes avec ce qui est décrit dans d'autres études. La combinaison de la variabilité des facteurs expérimentaux et inter-individuels conduit à des profils différents de ERD/ERS et peut expliquer les disparités entre les différentes études [Zaepffel and Brochier, 2012].

4.1 Absence de l'ERD

Comme décrit précédemment dans les figures 3.3, 3.1, 3.4 et 3.2, la réponse canonique dans les deux conditions yeux ouverts et yeux fermés, pour les bandes de fréquences alpha (8-12 Hz) et bêta (18-25 Hz) ne présente pas d'ERD. Or dans la littérature il est dit que l'amplitude de la désynchronisation pour les bandes de fréquences alpha est bien visible et elle est d'autant plus visible dans la bande de fréquences alpha qu'elle apparaît en réponse à n'importe quel type de tâche motrice et est topographiquement très répandue sur le cuir chevelu [Pfurtscheller and Lopes da Silva, 1999]. Cela peut être dû à des problèmes expérimentaux comme une relaxation trop intense des sujets à cause de la longueur de l'expérience. Il est bien connu que l'ERD, lors du pré-mouvement, reflète une préactivation des neurones dans les zones motrices. On peut supposer que la tâche motrice étant simple et répétitive, l'exécution du mouvement devient automatique et ne nécessite pas de pré-activation des neurones ce qui pourrait expliquer l'absence de l'ERD dans les deux expériences.

Il est aussi possible que les sujets soient moins concentrés vers la fin de l'expérience, cependant pour réduire ce biais nous avons réparti les tâches dans un ordre aléatoire de façon à ce qu'une tâche ne soit

pas biaisée par le fait qu'elle soit réalisée à la fin de l'expérience et que le sujet commence à fatiguer.

Il a été démontré qu'au niveau de l'électrode C3 de l'EEG, qui est localisée au niveau du cortex moteur correspondant à la main droite, le rebond bêta est localisé à cet endroit et a une plus grande amplitude [Pfurtscheller and Lopes da Silva, 1999]. En parallèle, le rythme alpha, localisé dans l'aire somatosensorielle primaire correspondant à l'électrode CP3 de l'EEG, est de plus grande amplitude dans cette zone [Neuper et al., 2006]. Pour notre expérience, afin de mieux visualiser les ERD, nous aurions pu nous intéresser au signal émis au niveau de cette électrode pour le rythme alpha. L'ERD est considéré par une activation du cortex moteur lors de la réalisation d'un mouvement, or il est possible que l'absence d'ERD dans nos résultats soient dus à la nature du mouvement étudié qui est une tâche motrice discrète et très rapide de l'index. Le cortex moteur est plus activé lors d'un mouvement de la main que d'un seul doigt. Pour la tâche expérimentale avec les yeux ouverts, il est probable que la réponse soit altérée par un mouvement passif et inconscient des yeux car il est assez difficile de fixer un point sans bouger les yeux pendant quatre minutes. Cela est confirmé par la revue [Kilavik et al., 2013], qui indique que l'ERD est absent quand on suit quelque chose du regard. De plus, il a été démontré que les stimuli visuels peuvent réduire l'amplitude de l'EEG [Vijn et al., 1991]. Une altération du signal EEG est observée lors des clignements des yeux qui induisent des artefacts. Cette hypothèse entre dans les composantes qui interviennent possiblement dans l'altération de la réponse cérébrale.

4.2 Modulations de l'ERS

Le profil bêta est très robuste. Les ERS qui apparaissent après le mouvement sont retrouvés chez presque tous les sujets, et après n'importe quel type de mouvement. Ce rebond bêta est dominant sur la zone sensorimotrice primaire contralatérale et avec un maximum d'une seconde après le mouvement [Pfurtscheller and Lopes da Silva, 1999]. Nos résultats correspondent à ceux établis dans la littérature. Un ERS est bien observé dans les deux expériences et lors d'une réponse canonique dans la condition yeux fermés et il se maintient entre 1,5 à 2 secondes après le mouvement.

Dans la figure 3.3 et 3.1, une grande variabilité entre les réponses cérébrales des différents sujets est observée. Certaines publications ont démontrés que l'ERS est lié sur le cortex moteur à des processus attentionnels [Zaepffel et al., 2013]. L'attention ou la concentration sont des paramètres très variables entre des individus et sont dépendant de nombreux facteurs. Ces variabilités peuvent étre dues à l'heure à laquelle l'expérience est réalisée ou à l'état de repos dans lequel le sujet se présente lors de l'expérience. Pour contrer les biais de ce type, nous avons pris soin de demander aux sujets s'ils leur convient de se présenter le matin ou l'après-midi afin d'éviter au maximum le facteur fatigue. Malheureusement, la durée de l'expérience qui induit une certaine fatigue et que nous n'avons pas pu réduire, dû à la difficulté à récupérer un nombre d'essais suffisant pour chaque intervalle, impacte forcément nos résultats.

Pfurtscheller a décrit dans une de ses études qu'en fonction de la partie du corps que l'on bouge, il est possible de préciser les bandes de fréquences à utiliser afin de mieux faire ressortir le rebond bêta [Pfurtscheller and Lopes da Silva, 1999]. Par exemple, dans ses travaux il précise que lors d'un mouvement du pied l'ERS bêta est légèrement plus haut entre 19-26 Hz et lors d'un mouvement du doigt, l'ERS bêta

est plus large entre 16-21 Hz. Pour nos résultats dans les bandes de fréquence bêta, la bande de fréquence que nous avons utilisée est de 18-25 Hz. Pour avoir des résultats plus spécifiques du mouvement étudié, nous aurions pu décider de prendre une bande de fréquence plus étroite.

Pour la réponse canonique en condition yeux fermés, l'amplitude de l'ERS est deux fois plus grande dans les bandes de fréquence bêta par rapport aux bandes de fréquence alpha comme observé sur la figure 3.5. Une des hypothèses présentées dans la littérature, est que l'ERS des bandes de fréquences alpha est produit par des zones corticales désactivées et pourrait représenter une activité corticale inhibitrice ou ralentie [Neuper et al., 2006].

De plus, des différences entre une tâche motrice réalisée de façon rapide ou lente ont été observées au niveau de l'EEG. Ces différences impactent uniquement le rebond bêta [Stancák and Pfurtscheller, 1996]. La rapidité du mouvement étudié dans notre expérience a peut-être une influence sur la vitesse à laquelle l'ERS apparaît. Cependant d'autres études montrent que la vitesse du mouvement n'a pas d'impact sur les oscillations observées il faudrait donc vérifier ce paramètre dans une étude ultérieure [Kilavik et al., 2013].

4.3 Modulations induites par la réduction des intervalles de temps entre deux mouvements successifs

Malgré sa robustesse, le rebond bêta est altéré lorsque l'on réalise des mouvements successifs de plus en plus rapprochés. Les résultats présentés dans les figures 3.6 et 3.7 nous ont permis de voir que plus on réduit l'intervalle de temps qui sépare deux mouvements successifs, plus l'amplitude de l'ERS diminue, jusqu'à presque disparaître pour les intervalles de temps les plus courts, compris entre 0,5-0,8 seconde. Dans la littérature, il est dit que le rebond bêta représente un état de désactivation corticale, soit un état de repos après un mouvement qui induit une diminution de l'excitation des neurones cortico-spinaux. Le fait que les mouvements soient trop rapprochés dans le temps ne laisse peut-être pas le temps à cette désactivation de se produire, ce qui expliquerait la disparition presque totale de l'ERS pour les mouvements séparés d'intervalles de temps très courts.

L'expérience 2, a mis en évidence pour les intervalles les plus courts, un décalage dans le temps de la réponse cérébrale en plus d'une stabilisation de la synchronisation pendant quelques secondes à la suite du deuxième mouvement. Certaines études, démontrent qu'une période après un mouvement est nécessaire et peut-être utilisée par le cortex sensorimoteur pour recalibrer ou restaurer le système moteur pour de nouvelles conditions dans le but de préparer le mouvement ultérieur [Kilavik et al., 2013]. Ce décalage est peut-être une conséquence du fait que les mouvements soient trop rapprochés dans le temps et que le cortex moteur a besoin d'un laps de temps entre deux tâches motrices pour se réinitialiser.

Précédemment, nous avons vu que la rapidité du mouvement impactait l'arrivée de l'ERS. Dans l'expérience 1, l'intervalle choisi entre deux mouvements est d'une seconde, et cela limite le nombre de classes que l'on peut faire pour regrouper les mouvements successifs. Nous n'avons donc que trois classes et cela ne nous permet pas de conclure sur cet aspect. Il est tout de même possible de remarquer une légère tendance, qui montre que les intervalles les plus courts compris entre 0,5-1,5 et 1,5-2,5 secondes, ont

une synchronisation qui commence 1 seconde avant le premier mouvement à la différence des intervalles les plus longs où l'ERS ne commence que 500 millisecondes avant le premier mouvement.

Cependant, l'expérience 2, ne conforte pas cette hypothèse. Pour les deux classes d'intervalles les plus longs, qui sont 1,1-1,4 et 1,4-1,7 seconde, l'ERS arrive bien 500 millisecondes avant le premier mouvement, comme précédemment mais les deux classes d'intervalles très courts contredisent les observations de l'expérience 1. Les intervalles compris entre 0,8-1,1 seconde ont un ERS qui apparaît au moment de l'initiation du premier mouvement et les intervalles compris entre 0,5-0,8 seconde ont un très léger ERS apparaît 500 millisecondes après l'initiation du premier mouvement mais cet ERS n'est peut-être pas significatif. Nous pouvons néanmoins émettre l'hypothèse, si les deux classes d'intervalles les plus courts ne sont pas considérés comme significatifs, que l'initiation du premier ERS, lors de deux mouvements successifs séparés d'un intervalle compris entre 1,1 et 2,5 secondes, se fait vers 500 millisecondes avant le premier mouvement. Lorsque les mouvements successifs sont séparés d'un intervalle plus long qui n'implique donc pas une rapidité pour la réalisation des mouvements l'ERS débute plus tardivement. Il serait intéressant de prendre des intervalles de temps plus précis pour l'expérience 1, pour les intervalles les plus longs pour savoir quelle est la tendance exacte d'apparition du deuxième ERS lors de mouvements un peu moins rapides.

Pour l'expérience 1, dans les intervalles 1,5-2,5 secondes, la première synchronisation ne diminue pas vraiment, une très légère diminution est observée et elle ne dure que 0,25 seconde, avant que la deuxième synchronisation n'apparaisse quasiment en continuité avec la première. Cette tendance est en contradiction avec l'expérience 2, où pour les intervalles 1,4-1,7 seconde une diminution de la réponse cérébrale est tout de même observée. Ces résultats ne sont pas suffisants pour émettre des hypothèses solides à cause du faible nombre de sujets ayant participé à chaque expérience. Dans l'idéal, il aurait fallu au minimum 20 sujets par expérience pour pouvoir conclure sur quelque chose de plus concret.

4.4 Perspectives

Pour notre expérience, principalement par manque de temps et dû au nombre limité de volontaires nous n'avons pas pris en compte certains paramètres qu'il serait intéressant de tester ultérieurement. La variabilité due au sexe des sujets pourrait faire l'objet d'une autre étude où l'expérience comparera les réponses cérébrales pour les femmes et pour les hommes.

Certaines études montrent que l'âge des sujets a un impact sur la réponse cérébrale [Gaetz et al., 2011]. Une diminution conséquente de la puissance a été mise en évidence mais seulement pour les bandes de fréquence gamma. Une étude complémentaire, composée de différentes classes d'âge et sur les différentes bandes de fréquence qui existent, pourrait être réalisée pour améliorer la connaissance du processus moteur et préciser à partir de quel moment exact cette diminution de puissance est observée et quelles bandes de fréquences sont les plus affectées. La réponse cérébrale est différente en fonction de notre hémisphère dominant. Notre expérience s'est intéressée à la réponse cérébrale induite par un mouvement de l'index droit au niveau du cortex gauche dû au fait que la réalisation d'un mouvement est répercutée de manière contralatérale sur le cortex. On pourrait envisager de faire la même expérience mais cette fois-ci sur des

sujets gauchers avec un mouvement de l'index gauche dans le but de comparer les réponses cérébrales pour une même tâche motrice entre les gauchers et les droitiers. Dans une perspective similaire, une autre expérience pourrait être faite, qui serait d'étudier le mouvements de l'index gauche pour les droitiers et inversement pour les gauchers.

Chapitre 5

Bilan personnel

Le LORIA est un lieu formidable, c'est une mosaïque de différentes cultures où travaillent des gens qui viennent du monde entier. La diversité de ce lieu en fait quelque chose de merveilleux. L'interaction avec des personnes qui viennent des quatre coins du monde est quelque chose qui a été très profitable et agréable pour moi.

Mon stage a été très enrichissant à plusieurs niveaux, autant humainement que intellectuellement. En participant aux réunions d'équipe, à différentes conférences et en interagissant avec les doctorants que j'ai rencontré, j'ai pu me faire une idée plus précise de ce que représente la recherche. Cela m'a permis d'envisager de nouvelles perspectives pour mon projet professionnel.

J'ai été très étonnée de constater la grande liberté que donne ce laboratoire à son personnel. Cela m'a permis de remettre en cause certains des préjugés que j'avais sur le fait de ne pas être cadré surtout sur les horaires de travail. J'ai aussi réalisé que lorsque l'on travaille sur un sujet qui nous passionne les horaires ne comptent plus. La preuve, je me suis surprise à proposer de faire des heures supplémentaires à plusieurs reprises durant mon stage.

Avant de commencer mon stage j'appréhendais un peu sur le bon déroulement de celui-ci, puisque je n'avais aucune expérience des techniques utilisées et que le domaine des neurosciences n'a été abordé que superficiellement dans mon cursus. Cependant ce domaine me passionne, c'est ce qui m'a poussé à me sortir de ma zone de confort et de tenter cette expérience. Je suis très satisfaite des tournures qu'ont pris les événements, même si j'ai rencontré certaines difficultés pour me familiariser avec certains logiciels informatiques, ce stage restera gravé dans ma mémoire.

Chapitre 6

Résumé

De nombreuses études ont été réalisées sur profil de la réponse cérébrale motrice dans différentes conditions et en fonction de différents types de mouvement. Cependant certaines zones d'ombre restent à éclaircir. Très peu d'études mettent en avant les différences entre la réponse cérébrale obtenue lors de la réalisation de tâches motrices simples et isolées dans le temps, c'est-à-dire séparés d'une fenêtre temporelle relativement longue et en comparant les conditions yeux ouverts/yeux fermés. Cette étude consiste à comparer ces réponses cérébrales et pourrait apporter des informations complémentaires à la connaissance scientifique dans le domaine des interfaces cerveau-ordinateur. Le but principal de notre étude a été d'observer l'activité cérébrale lors de la réalisation de mouvements successifs de plus en plus rapprochés, plus particulièrement au niveau du rythme bêta qui est le plus représentatif du mouvement volontaire. Cette étude nous a permis d'émettre certaines hypothèses vis-à-vis de la modulation de la réponse cérébrale lors de la réduction des intervalles de temps qui séparent deux mouvements successifs. En effet, lors de deux mouvements rapprochés, l'Event-Related Synchronization (ERS) semble ne plus s'exprimer.

Several studies have been made on the profile of the motor cerebral response in different conditions and different types of movements. However there are still grey areas that must be clarified. Very few studies highlight the differences between the cerebral response obtained during the realization of simple motor tasks isolated in time, which means separated by a relatively long time window and by comparing the open and closed eyes conditions. This investigation is partly made to compare these cerebral responses and could provide additional information to the scientific knowledge which could then be deepened by other experiments. The main purpose of our study was to observe what is happening during the realization of successive movements increasingly closer, in particular at the level of beta rhythms which are the most representative of voluntary movement. This study allowed us to make certain assumptions about the modulation of cerebral response during the reduction of time intervals that separate two successive movements. With two successive movements, the Event-Related Synchronization (ERS) seems to be abolished.

Bibliographie

- [Gaetz and Cheyne, 2006] Gaetz and Cheyne (2006). Localization of sensorimotor cortical rhythms induced by tactile stimulation using spatially filtered meg. *Neuroimage*, 3 :899–908.
- [Gaetz et al., 2011] Gaetz, J., Edgar, J., Wang, D., and Roberts, T. (2011). Relating meg measured motor cortical oscillations to resting - aminobutyric acid (gaba) concentration. *NeuroImage*, 55 :616–621.
- [Gevins et al., 1990] Gevins, A., Brickett, P., Costales, B., Le, J., and Reutter, B. (1990). Beyond topographic mapping : towards functional-anatomical imaging with 124-channel eegs and 3-d mris. *Brain Topogr*, 3(1) :53–64.
- [Haggard, 2005] Haggard, P. (2005). Conscious intention and motor cognition. *Trends Cogn Sci*, 9(6) :290–295.
- [Hagner, 2012] Hagner, M. (2012). The electrical excitability of the brain : toward the emergence of an experiment. *J Hist Neurosci*, (21) :237–49.
- [Kilavik et al., 2013] Kilavik, B. E., Zaepffel, M., Brovelli, A., MacKay, W. A., and Riehle, A. (2013). The ups and downs of beta oscillations in sensorimotor cortex. *Exp Neurol*, 245 :15–26.
- [Mark et al., 2007] Mark, F., Barry, W., Connors, Michael, A., and Paradiso (2007). *Neurosciences à la découverte du cerveau 3ème édition*. Pradel.
- [Neuper et al., 2006] Neuper, C., Wörtz, M., and Pfurtscheller, G. (2006). Erd/ers patterns reflecting sensorimotor activation and deactivation. *Prog Brain Res*, 159 :111–122.
- [Penfield and Rasmussen, 1952] Penfield, W. and Rasmussen, T. (1952). The cerebral cortex of man, a clinical study of localization of function. *American Journal of Physical Medicine*, 33 :126.
- [Pfurtscheller, 1977] Pfurtscheller, G. (1977). Graphical display and statistical evaluation of event related desynchronization(erd). *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 43 :757–760.
- [Pfurtscheller, 1992] Pfurtscheller, G. (1992). Event-related synchronization (ers) an electrophysiological correlate of cortical areas at rest. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*, 83 :62–69.
- [Pfurtscheller and Lopes da Silva, 1999] Pfurtscheller, G. and Lopes da Silva, F. H. (1999). Event-related eeg/meg synchronization and desynchronization : basic principles. *Clin Neurophysiol*, 110(11) :1842–57.
- [Shemmell et al., 2010] Shemmell, J., Krutky, M., and Perreault, E. (2010). Stretch sensitive reflexes as an adaptive mechanism for maintaining limb stability. *Clin neurophysiol*, 121 :1680–1689.

- [Stancák and Pfurtscheller, 1996] Stancák, A. and Pfurtscheller, G. (1996). Event-related desynchronisation of central beta-rhythms during brisk and slow self-paced finger movements of dominant and nondominant hand. *Brain Res Cogn Brain Res.*, 3 :171–183.
- [Vijn et al., 1991] Vijn, P., Van Dijk, B., and Spekreijse, H. (1991). Visual stimulation reduces eeg activity in man. *Brain Res.*, 1 :49–53.
- [Zaepffel and Brochier, 2012] Zaepffel, M. and Brochier, T. (2012). Planning of visually guided reach-to-grasp movements : inference from reaction time and contingent negative variation (cnv). *Psychophysiology*, 49(1) :17–30.
- [Zaepffel et al., 2013] Zaepffel, M., Trachel, R., Kilavik, B., and Brochier, T. (2013). Modulations of eeg beta power during planning and execution of grasping movements. *PLoS One.*, 3 :1680–1689.